雄安新区地热资源与开发利用研究*



庞忠和[1,2,3]　孔彦龙[1,2,3]　庞菊梅[1,2]　胡圣标[1,2,3]　汪集暘[1,2,3]

1 中国科学院地质与地球物理研究所 地热资源研究中心 北京 100029
2 中国科学院地球科学研究院 北京 100029
3 中国科学院大学 地学院水文地质与地热资源教研室 北京 100049

摘要　雄安新区地热资源丰富且比较容易开采，在生态文明建设中可发挥重要作用。雄安新区浅层（<200米）地热能宜于开采；深层（200—3 000米）地热能中的砂岩储层和碳酸盐岩储层热量大，宜于开采；超深层（>3 000米）地热能也具有开采潜力。雄安新区的雄县在利用大型岩溶热储开展规模化供暖方面，单一项目已实现世界最大（450万平方米）供暖能力。文章认为，雄安新区应该加大地热资源勘查力度，重点是超深层碳酸盐岩热储；在利用上，要做到因地制宜，深、浅资源合理配置，还要重视环境保护，协调好与其他资源利用的关系；同时，要发展地热储能技术，形成以地热为主体，多能互补的"地热+"的清洁能源利用新格局。

关键词　雄安新区，大型岩溶热储，地热供暖，规模化开采，回灌技术，地热示踪，热储监测

DOI　10.16418/j.issn.1000-3045.2017.11.007

设立河北雄安新区是以习近平同志为核心的党中央根据新时代的国家发展需要作出的重大决策，是千年大计、国家大事。要建设蓝绿交融、水天一色的生态友好城市，必须做好大气污染防治工作以及其他环境保护工作。

冬季是华北地区雾霾频发的时期，2016年12月21日，习近平总书记在中央财经领导小组第十四次会议上的讲话中提到："推进北方地区冬季清洁取暖，关系北方地区广大群众温暖过冬，关系雾霾天能不能减少，是能源生产和消费革命、农村生活方式革命的重要内容"，明确指出，清洁取暖是从源头上治理雾霾的关键一环。

基于长期的研究工作，笔者团队早在20世纪80年代就已经阐明，华北地区地热资源丰富，其中京津冀地区最为丰富。21世纪以来，以雄安新区的雄县为例，集中开展了大型岩溶热储评价与开发关键技术研究。理论模型和现场实践结果均表明，华北地区广泛分布的碳酸盐岩储层中发育的大型岩溶热储，规模大，地热资源品质优，可以实施采灌平衡的大

*资助项目：国家自然科学基金（41372257），中国石油化工集团新星石油公司项目（51460960）
修改稿收到日期：2017年11月3日

规模开发利用，属世界罕见，可以支撑地热供暖形成产业，替代燃煤，缓解该地区雾霾。本文尝试对21世纪以来华北地热研究工作，特别是大型岩溶热储的地热研究以及雄县地区的地热开发利用中热储工程关键技术作简要回顾和分析，并就下一步工作提出建议。

1 大型岩溶热储成因与评价

与化石能源相比，地热能具有强大的社会经济与环保优势，其利用过程中基本不排放污染物，也不会排放大量 CO_2。与太阳能和风能相比，地热能是一种连续稳定的能源，一年365天、每天24小时稳定存在；而且，地热利用效率高，可以做到“热电联产”，同时供应暖气和热水[1]。

中科院的地热团队在华北地区开展了长期的地热研究，“六五”计划期间（1980—1985年），开展了系统的地温测量和大地热流测试，收集整理了石油勘探的地热资料，圈划出相对高温区域，开展地温场的数学模拟，探讨了该地区的构造-热演化特点[2-4]。20世纪90年代开展了冀东油田地热资源研究（企业委托项目）；“十一五”规划期间（2005—2010年），开展了华北地区深部煤矿山热害防治研究（“973”计划项目），针对煤层与碳酸盐岩热储组合结构，研究热量聚集与热害形成机理与分布特点。“十二五”规划期间（2010—2015年），开展了渤海湾盆地 CO_2 地质封存中的地热问题研究（“863”计划项目）、典型热储成因分析与开发利用技术研究（企业委托项目）、大型岩溶热储对规模化开采的响应研究（国家自然科学基金委资助项目）。此外，还有“华北克拉通破坏的地热模型制约”（国家自然科学基金委资助项目）等基础性研究工作。基于长期的研究，笔者团队发现雄安新区地下蕴藏着极其丰富的地热资源。仅就地下3 000米以浅的经济深度而论，就有3类地热资源和热储层可供利用，归纳如下。

（1）*浅层地热能。*位于地下200米以浅，可与地源热泵技术相结合，达到节能目的。地源热泵供暖效率通常比普通空调高4倍，比空气源热泵高2倍。此类地热资源的利用，采用地埋管换热方式，不破坏环境，节电、节煤效果显著。雄安新区浅层地热能在地下空间合理调配的基础上比较适合利用。

（2）*砂岩热储。*位于地下200米至3 000米深度范围内，可以采用抽水加回灌的方式利用，可用于供暖或供热，替代燃煤，减缓雾霾。不过，此类热储层有一定局限性，主要缺点是有一些地区回灌比较难，平均只有30%回灌率，即每开采100立方米热水，只有30立方米左右可以顺利回灌到地下。剩下的部分，若排放到地表水体，则会带来污染，达不到清洁能源的要求。因此，此类资源应该慎用，可以实行以灌定产的政策加以调控。

（3）*碳酸盐岩热储。*位于地下1 000米至3 000米深度范围内，其中的中、晚元古界岩溶（喀斯特）特别发育，形成大型岩溶热储，可用于供暖或供热。在雄安新区，广泛分布着元古界雾迷山组白云岩热储，总厚度可达数千米，千米深处的温度在60℃以上。其最大优点是出水量大，尾水可以100%回灌到地下，实现循环利用。

雄安新区以上3种类型地热资源的储量计算结果如表1所示，其中浅层地热能资源量参考中国地调局的评价结果[5]，砂岩热储和碳酸盐岩热储的资源量采用类比法由雄县地热田的资源量[6-8]推算求得。

表1　雄安新区地热资源与储量估算

指标	浅层地热能	砂岩热储	碳酸盐岩热储
深度范围（m）	0—200	200—3 000	1 000—3 000
热资源量（10^{16} kJ）	—	66.6	77.4
折合标煤（10^9 t）	—	227.7	264.1
可回收热量（10^{16} kJ）	0.1	16.65	19.35
折合标煤（10^9 t）	0.4	56.8	66.0

注：“—”表示未采集数据

在开展大量的水文地质、地球物理与地球化学等工作基础上，我们建立了以牛驼镇地热田为代表的雄安新区地热资源的“二元聚热”成因模式（图1），其中的“一

元”是岩石热导率因素，另外“一元”是盆地尺度地下水循环因素，渤海湾盆地丰富的地热资源正是在此双重机制耦合作用下导致的地热再分配而聚集形成的。雄安新区地热资源热源是裂谷盆地型较高的热流背景，其传热方式在新生界盖层以传导为主，在基岩储层以对流为主。因此，属于“对流-传导型地热系统”[7,9]。大型岩溶热储层以蓟县系为主，上覆第四系和新近系为其盖层。其中的地下水循环属于相对独立的系统。对于地热资源形成条件的认识，为雄安新区的地热开发利用规划提供了科学依据，并为超深层地热资源勘探提供了前瞻性信息。

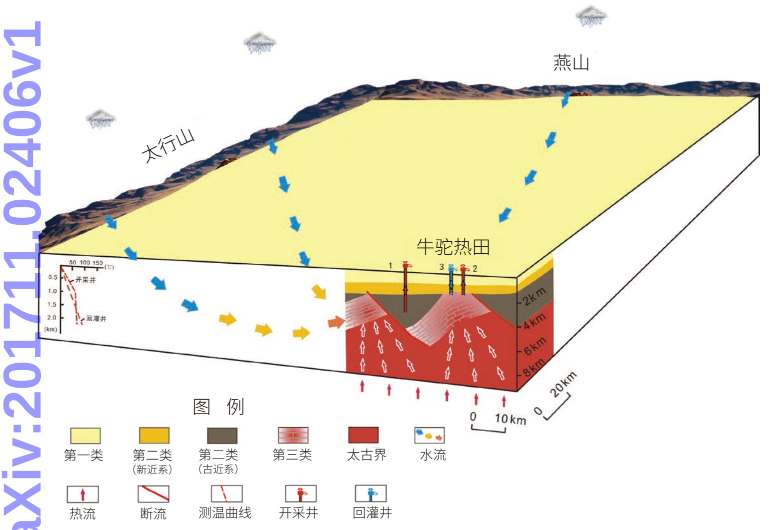


图 1 雄安新区深层地热资源“二元聚热”成因模式图[7]

最近完成的针对雄安新区地热流体的地球化学和同位素研究，提供了地热系统物质来源和形成条件的重要信息，以及估算超深层地热储层温度的机会。笔者认为，地热田地热气体以壳源成因为主。气体中氦的体积含量比较高（0.08%—0.52%），其中 5%—8% 源于地幔。雾迷山组碳酸盐岩储层地热水化学类型为 Cl-Na 型，气体主要成分为CH_4、N_2、CO_2，其中CO_2为碳酸盐岩热变质的成因。热成因 CO_2 的加入对深部碳酸盐岩储层的岩溶发育起到了促进作用。根据氦同位素组成，该区壳幔热结构中幔源热流占地表热流的比例为 48%—51%。根据化学热力学地温计的计算结果，目前开采层位地热水温度为 66℃—108℃[10-13]。依据 CO_2/N_2 气体相对组分地温计和CO_2-CH_4 间碳同位素地温计，地热田深部储层温度的平均值分别为 163℃ 和 153℃①。深部储层温度为超深层勘查提供了新的信息。

2 先进的地热开采关键技术及示范工程

地热资源开发利用技术经历了两代的演变。第一代技术的基本特征是直采、直供、直排，由于环保水准很低，现已放弃不用。第二代技术是采灌结合、用热不用水，环保水准很高，已经得到各地政府的重视和推广应用。在我国，浅层地热能的利用技术比较成熟。只要抓好严格监管等工程质量控制措施，大部分地方都可以使用。实践中，一般鼓励地埋管模式的土壤源热泵系统，限制需要抽水的地下水源热泵系统，以保护宝贵的地下水资源。对于中深层砂岩热储，在回灌条件好的地方，普遍采用第二代技术，回灌技术也在不断进步中。对于基岩中的岩溶热储，逐步形成了规模化、产业化的地热开发利用技术体系，并进行了应用实践。

2009 年起，中国石化集团绿源地热能开发有限责任公司开始投资建设雄县地热供暖项目。在此过程中，中科院地热团队受邀提供持续的地热储技术支持与技术服务。经过几年的努力，终于建成了中国第一个用地热供暖替代燃煤的“无烟城”。雄县地热供暖示范工程基于政产学研用相结合的方式，首次实现了地热利用高效率和接近零排放高水准的清洁能源利用双重目标，迄今已经平稳运行了 8 年。2014 年初，国家能源局开始把雄县地热供暖的示范项目向北方地区推广。2016 年，雄县县城地区的人口 9 万，拥有地热井 68 口，其中回灌井 24 口，形成供暖能力 450 万平方米，基本实现了地热集中供暖全覆盖。雄县采用的是第二代技术，实现了近 100% 回灌，做到了用热不用水。示范工程的亮点包

① Pang J M, Pang Z H, Lv M, et al. Geochemical and isotopic characteristics of fluids in the Niutuozhen geothermal field, North China. Environmental Earth Sciences, 2017, in press.

括：地热供暖城区全覆盖，项目规模世界上最大（供暖能力450万平方米，现状运行280万平方米，惠及9万人口），单井平均供暖能力高达10万—15万平方米，尾水原水全额同层回灌。

在过去20年里，我国地热资源直接利用总量一直处于世界第一的位置，目前还比美国高1倍以上；同时，一般供热系统的主体设备都是国产化的，因而技术基础较好。在尾水回灌技术上，通过持续探索，形成了可支持规模化开发利用的热储回灌技术系列。雄县地热田回灌始于2010年，截至2016年底，雄县地热田的累计回灌量已达到2 383万立方米。地热尾水的回灌避免了地表排放带来的污染，也有效地减缓了热储压力的下降[14]（图2）。

雄安新区岩溶热储层的非均质性强，采灌井之间的连通性不易确定。示踪技术可以将运移参数量化，有效刻画储层流体的特征，研究回灌井和开采井之间的水力联系，对长期回灌可能引起的开采井温度的冷却进行预测。笔者团队从2011年起，在雄县地热田进行了3次群井示踪试验，取得了试验区内岩溶储层采灌井之间连通性的有效参数，包括通道长度、渗透流速、纵向弥散度等，为后期采灌井距和采灌井布局的数值模拟研究提供了科学基础[15,16]。试验结果揭示了回灌井不同方向的渗透流速（图3）和采灌井之间连通性好的方向（图4）。

采灌井的合理布局和最优井距是地热田优化开采极为关键的两方面内容，关系到企业的生产成本和热田的使用寿命。为此，笔者团队建立了一套用于评价热田合理布局和最优井距的方法，即在建立地热田地热地质模型的基础之上，采用数值模拟技术，模拟热储的温度和压力对不同采灌情景的响应（图5和6），进而以经济学模型为依据，以回灌带来的开采水温下降与水位下降所产生的最小损失为目标函数，确定最优采灌井距和优化开采模式[17]。通过该方法可知，雄县地热田在对井模式下，采灌井最优井距为400米（图7）。

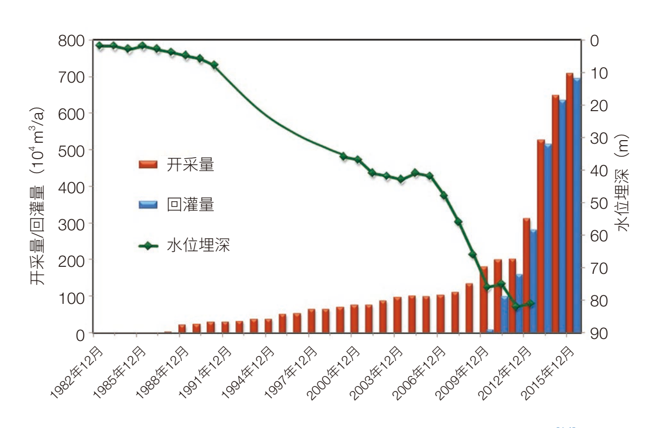


图2 雄县地热田地热水采灌量与地热井水位变化[14]

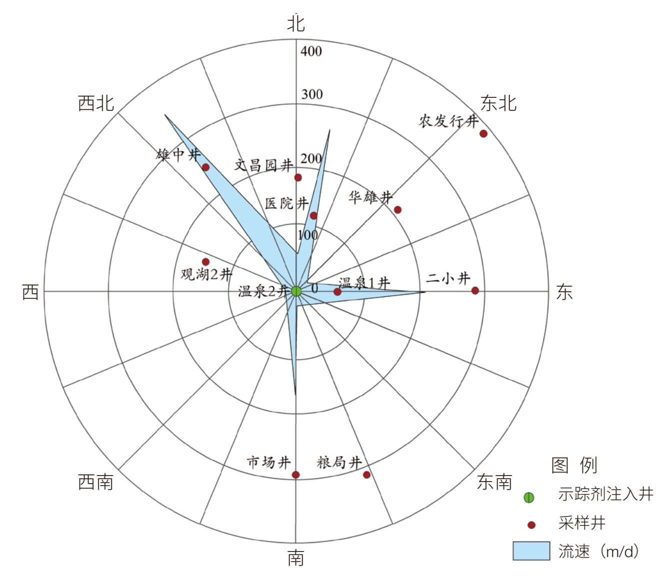


图3 雄县地热田2013年示踪试验地热水渗透流速雷达图[15]

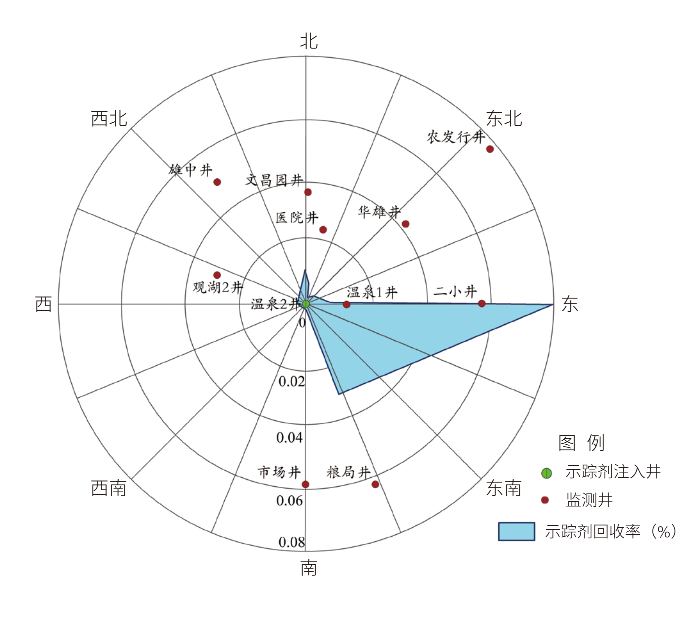


图4 雄县地热田2013年示踪试验示踪剂回收率雷达图[15]

示踪剂回收率较高的地方即为优势通道区位

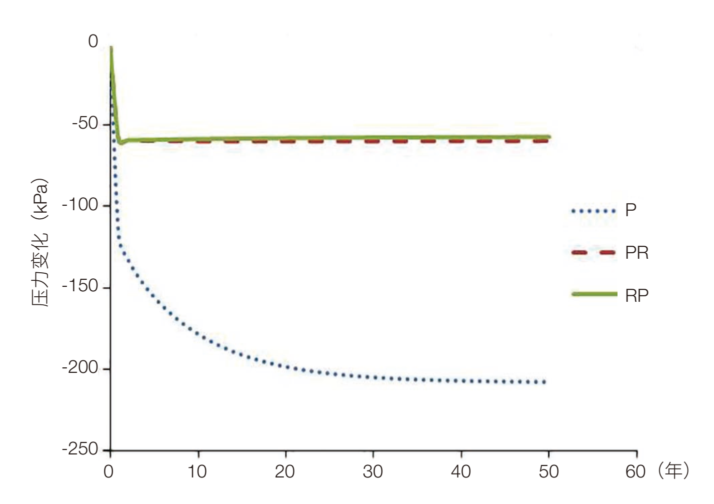


图 5 雄县地热田基于数值模拟技术在不同布局模式下的水头变化[17]
P：只有生产井的开采模式；PR：生产井在上游，回灌井在下游的开采模式；RP：生产井在下游，回灌井在上游的开采模式

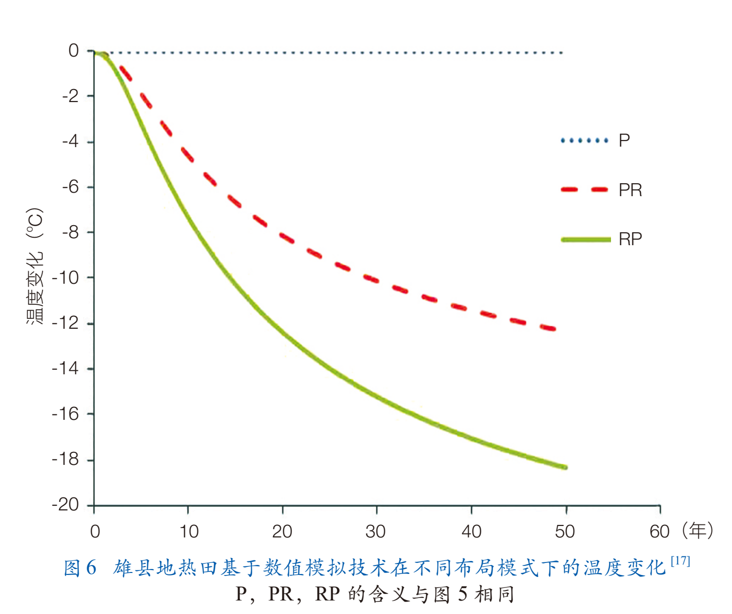


图 6 雄县地热田基于数值模拟技术在不同布局模式下的温度变化[17]
P，PR，RP 的含义与图 5 相同

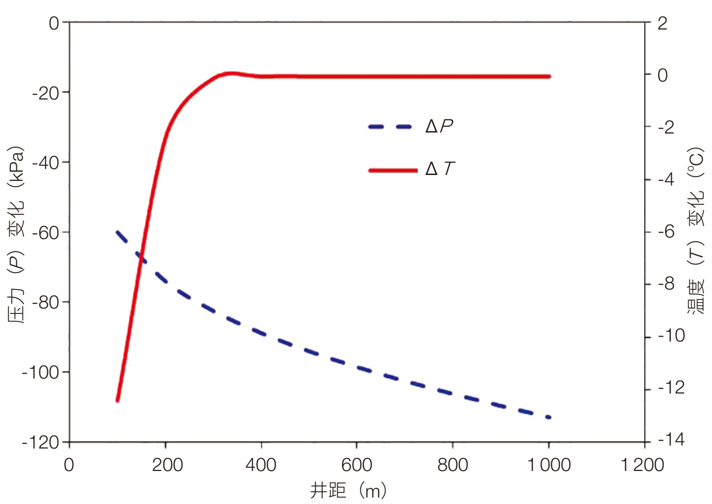


图 7 雄县地热田基于数值模拟技术在不同采灌井距背景下 50 年内温度与压力的变化[17]

3 地热开发利用建议

雄安新区的地热资源丰富，特别是岩溶热储面积广、储量大、水质好、温度高、易采易灌，有利于开发利用。雄安新区在地热利用上已经先行了一步，拥有成功的经验，通过向全国推广，势必发挥雄安新区在能源结构转型中的引领作用。以下针对如何进一步做好地热资源开发利用工作，提一些具体建议。

3.1 加强领导，政策扶持

采取必要政策措施与资金扶持，引导地方加大推广力度，出台优惠政策，鼓励各类企业积极参与，提升开发效率和水平，逐步形成和发展绿色地热能源产业。为实现更快的技术进步和更大范围的推广应用，建议将地热资源利用纳入大气污染防治的总体规划之中。

3.2 精准评价，摸清家底

地球的地热总能量虽然巨大，但其分布很不均匀，要想加以经济合理的有效利用，还需要找到它们的聚集地。只有在这些地方（聚集地），地热才能被有效地加以开发利用。进行清晰的地热资源成因模式研究、准确的地热资源储量评价研究，不断开辟新的资源储备，是地热资源规模化可持续利用的基础。因此，建议进一步加强地热资源勘查，查清更深层地热储层发育状况和地热资源开发利用条件。

3.3 因地制宜，深浅结合

在地热资源利用上，应该针对资源条件和供暖需求，综合考虑中深层和浅层地热能的适宜性。以下原则可供参考：（1）在雄县模式的基础上，雄安新区应该立足于高起点、高标准、高水平的地热资源开发利用；（2）在容积率比较低的住宅区，可采用浅层地热能供暖，地源热泵是新型节能技术，在地下空间合理协调的前提下，应该充分加以利用；（3）在集中办公区域宜采用中深层地热能供暖。

3.4 依托地热，多能互补

一方面，加强地热系统运行的长期动态监测和定量化热储模拟；另一方面，对于砂岩热储和岩溶热储开发

利用条件稍差的地方，开展储层改造技术研发和试验。同时，鼓励探索以地热能为主体，多种清洁能源融合的“地热+”第三代技术的研发与应用示范。

参考文献

1 庞忠和, 胡圣标, 汪集暘. 中国地热能发展路线图. 科技导报, 2012, 30(32): 18-24.

2 陈墨香. 华北地热. 北京: 科学出版社, 1988.

3 陈墨香, 黄歌山, 张文仁, 等. 冀中牛驼镇凸起地温场的特点及地下热水的开发利用. 地质科学, 1982, (3): 239-252.

4 陈墨香, 汪集暘, 王缉安, 等. 华北断陷盆地地热场特征及其形成机制. 地质学报, 1990, 64(1): 80-90.

5 王贵玲. 地热能助力雄安新区生态城市建设. 海利丰2017第九届中国国际地源热泵行业高层论坛. [2017-10-26]. http://www.dyrbw.com/news/show.php?itemid=73404.

6 Duan Z F, Pang Z H, Wang X Y. Sustainability evaluation of limestone geothermal reservoirs with extended production histories in Beijing and Tianjin, China. Geothermics, 2011, 40(2): 125-135.

7 Pang Z H, Pang J M, Kong Y L, et al. Large karstic geothermal reservoirs in sedimentary basins in China: Genesis, energy potential and optimal exploitation//Proceedings of the World Geothermal Congress 2015. Melbourne, 2015. https://pangea.stanford.edu/ERE/db/WGC/papers/WGC/2015/32010.pdf.

8 Yang F T, Liu S L, Liu J X, et al. Combined monte carlo simulation and geological modeling for geothermal resource assessment: a case study of the Xiongxian geothermal field, China//Proceedings of the World Geothermal Congress 2015. Melbourne, 2015. https://pangea.stanford.edu/ERE/db/WGC/papers/WGC/2015/16040.pdf.

9 庞忠和, 胡圣标, 王社教, 等. 地热系统与地热资源. 见: 汪集暘, 等. 地热学及其应用. 北京: 科学出版社, 2015: 257-372.

10 Kong Y L, Pang Z H, Pang J M, et al. Stable isotopes of deep groundwater in the Xiongxian geothermal field. Procedia Earth & Planetary Science, 2017, 17: 512-515.

11 Kong Y L, Pang Z H, Pang J M, et al. Deep groundwater cycle in Xiongxian geothermal field//Proceedings of the World Geothermal Congress 2015. Melbourne, 2015. https://pangea.stanford.edu/ERE/db/WGC/papers/WGC/2015/15045.pdf.

12 Kong Y L, Pang Z H, Shao H B, et al. Recent studies on hydrothermal systems in China: a review. Geothermal Energy, 2014, 2(1): 19.

13 Wang S F, Pang Z H, Liu J R, et al. Origin and evolution characteristics of geothermal water in the Niutuozhen geothermal field, North China Plain. Journal of Earth Science, 2013, 24(6): 891-902.

14 王树芳. 水热过程示踪与模拟及地热资源优化开采—以华北牛驼镇地热田为例. 北京: 中国科学院地质与地球物理研究所, 2011.

15 庞菊梅, 庞忠和, 孔彦龙, 等. 岩溶热储井间连通性的示踪研究. 地质科学, 2014, 49(3): 915-923.

16 Pang J M. Reinjection into well ST0902 and tracer testing in the Xiongxian geothermal field, Hebei Province, China //Reports 2010 of geothermal training programme, United Nations University. Reykjavik, 2010: 493-524. http://os.is/gogn/unu-gtp-report/UNU-GTP-2010-25.pdf.

17 Kong Y L, Pang Z H, Shao H B, et al. Optimization of well-doublet placement in geothermal reservoirs using numerical simulation and economic analysis. Environmental Earth Sciences, 2017, 76(3): 118.

Geothermal Resources and Development in Xiongan New Area

Pang Zhonghe[1,2,3] Kong Yanlong[1,2,3] Pang Jumei[1,2] Hu Shengbiao[1,2,3] Wang Jiyang[1,2,3]

（1 Geothermal Resources Research Center, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

2 Institutions of Earth Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

3 Department of Hydrogeology and Geothermal Resources, College of Earth Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China）

Abstract Xiongan New Area is rich in geothermal resources, which may play a key role in the construction of ecological civilization. The shallow geothermal energy (<200 m), and deep geothermal energy stored in sandstone and karstic reservoirs are rich and suitable for exploition and utilization. The deep carbonate geothermal resources is particularly large and easy to be exploited. Geothermal resource stored in super deep layer（>3000 m）is also of good potential. The Xiongxian City located in the Xiongan New Area, has pioneered in the large-scale district heating using karstic geothermal resources, which is the largest single project in the world that has a total geothermal heating capacity of 4.5×10^6 m^2. The author believes that the exploration of geothermal resources in the future should be enhanced, especially in super-deep geothermal resource exploration. On the use of geothermal energy, we should make full use of the shallow geothermal energy, adjust measures to local conditions, and make rational allocation of shallow and deep geothermal resources. In addition, we should also pay attention to environmental protection, and coordinate the relationship between geothermal resources and other energy. At the same time, we should widely apply the technique taking advantage of storage function of geothermal reservoirs, and gradually construct the new development pattern of clean energy that geothermal energy is used as main body and others are complementary energy.

Keywords Xiongan New Area, large scale karstic geothermal reservoirs, geothermal district heating, large scale geothermal use, reinjection technology, geothermal tracing, monitoring of geothermal reservoirs

庞忠和 中科院地质与地球物理所地热资源中心主任，中国地球物理学会理事，地热专业委员会主任，国际地热协会教育委员会委员，中-德地热研究中心中方负责人。主持完成地下水、地热资源和CO_2地质封存方面的国家级和国际组织资助科研项目，在国内外重要刊物发表论文100余篇，包括*SCI*论文50余篇。目前重点研究大型地热田形成理论与可持续开发关键技术。E-mail: z.pang@mail.iggcas.ac.cn

Pang Zhonghe Director of Geothermal Resources Research Center, Institutions of Earth Science, Chinese Academy of Sciences (CAS), Chairman of Geothermal Committee, Chinese Geophysical Society, Member of Education Committee, International Geothermal Association, Director of Sino German Geothermal Research Center. He has served as principal scientific investigator and taken lead in completing many research projects supported by national and international funding sources, including the CAS, China Geological Survey (CGS), National Natural Science Foundation of China (NSFC)，International Atomic Energy Agency (IAEA), Ministry of Science and Technology (MOST) as well as SINOPEC. He has published over 100 peer-reviewed articles in international/domestic journals, including 50 international peer-reviewed journals. At present, he mainly focuses on the formation mechanism of large-scale geothermal field and key technologies of sustainable development. E-mail: z.pang@mail.iggcas.ac.cn